

103年度電動車暨省油車技術發表會 發展典範科技大學計畫

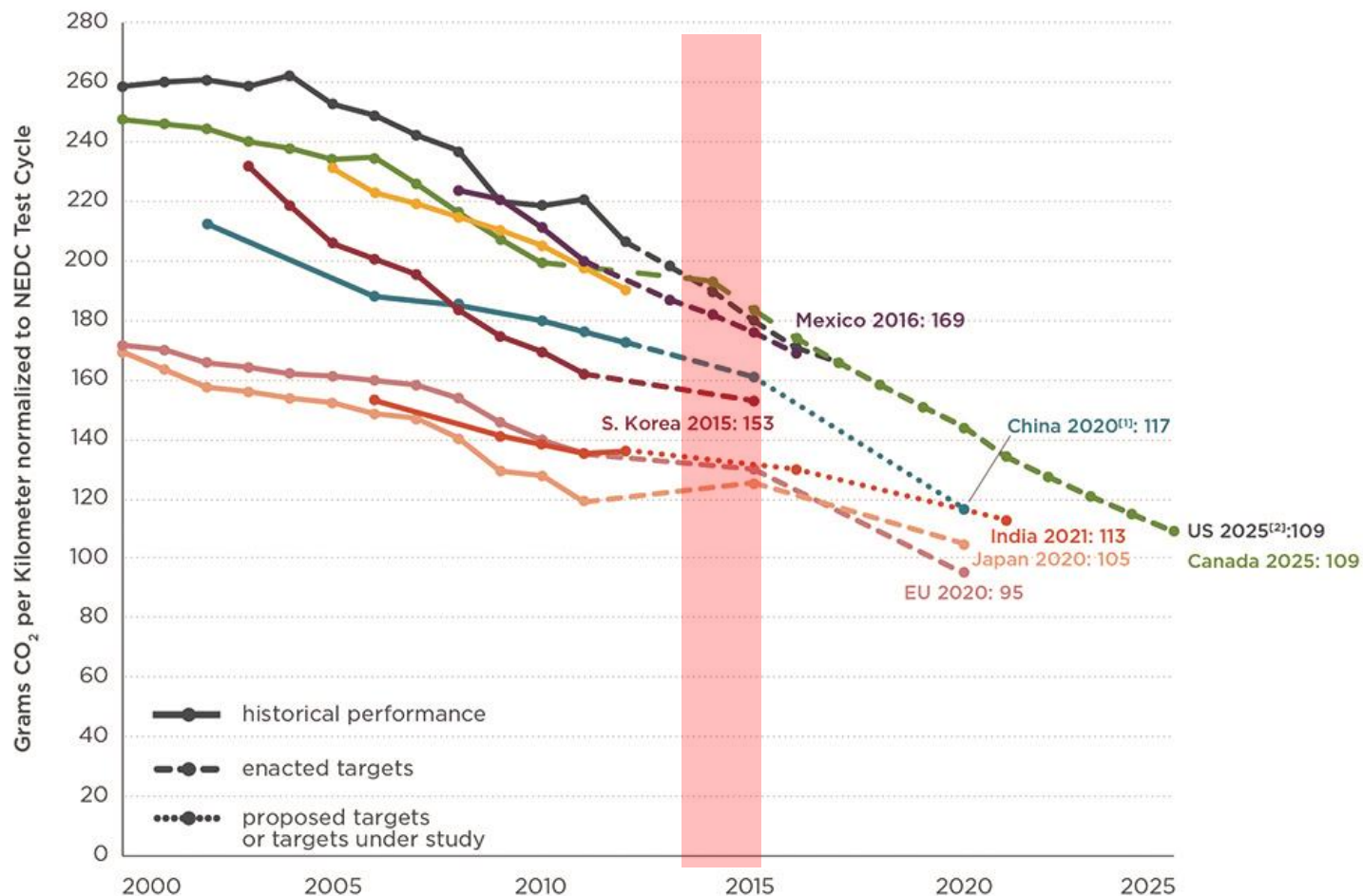
用於輕混油電複合車之感應馬達驅動技術

黃明熙

台北科技大學 電機系

103年7月31日

BSG系統簡介

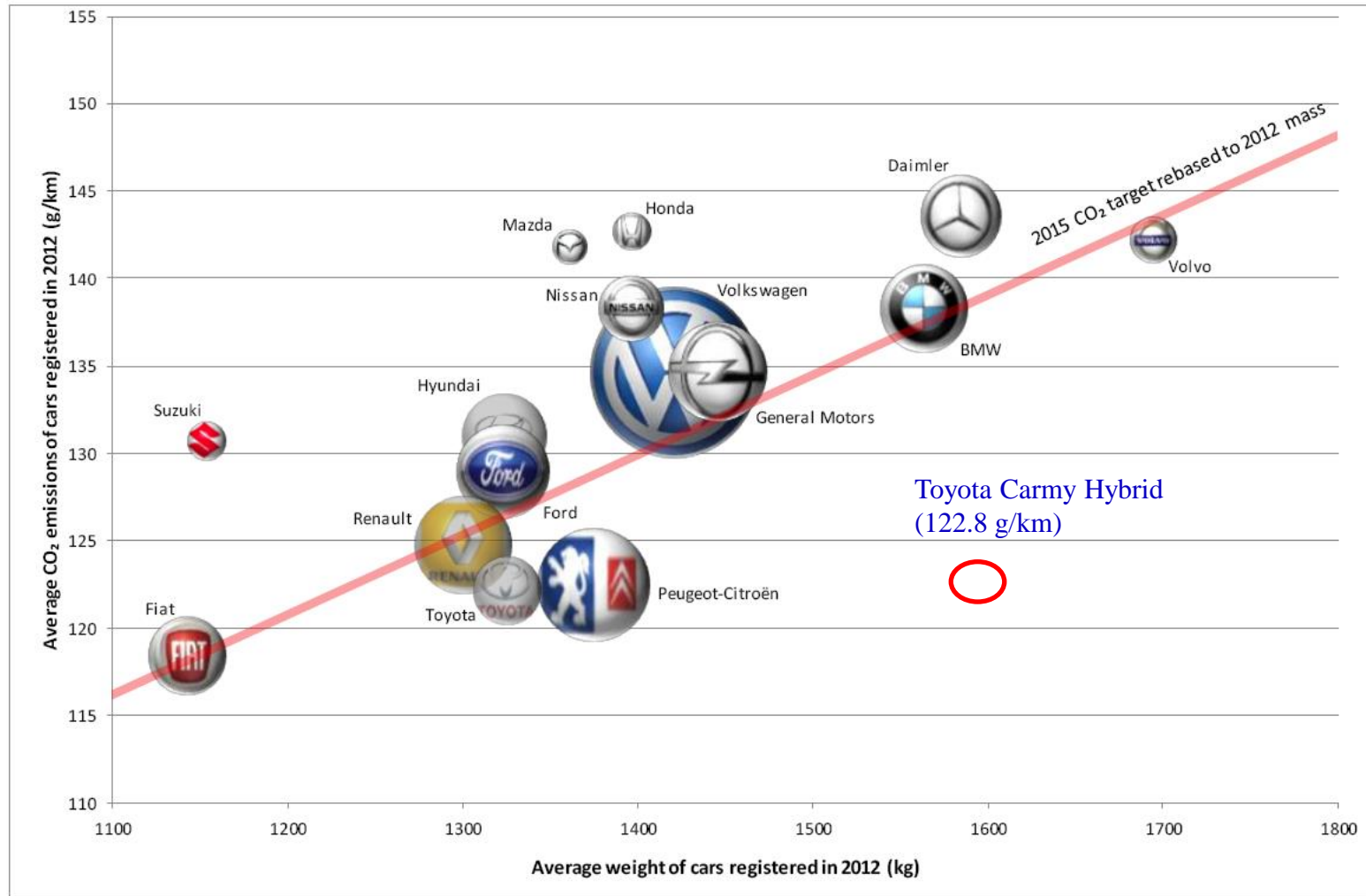


[1] China's target reflects gasoline vehicles only. The target may be higher after new energy vehicles are considered.

[2] US, Canada, and Mexico light-duty vehicles include light-commercial vehicles.

[3] Supporting data can be found at: <http://www.theicct.org/info-tools/global-passenger-vehicle-standards>

BSG系統簡介



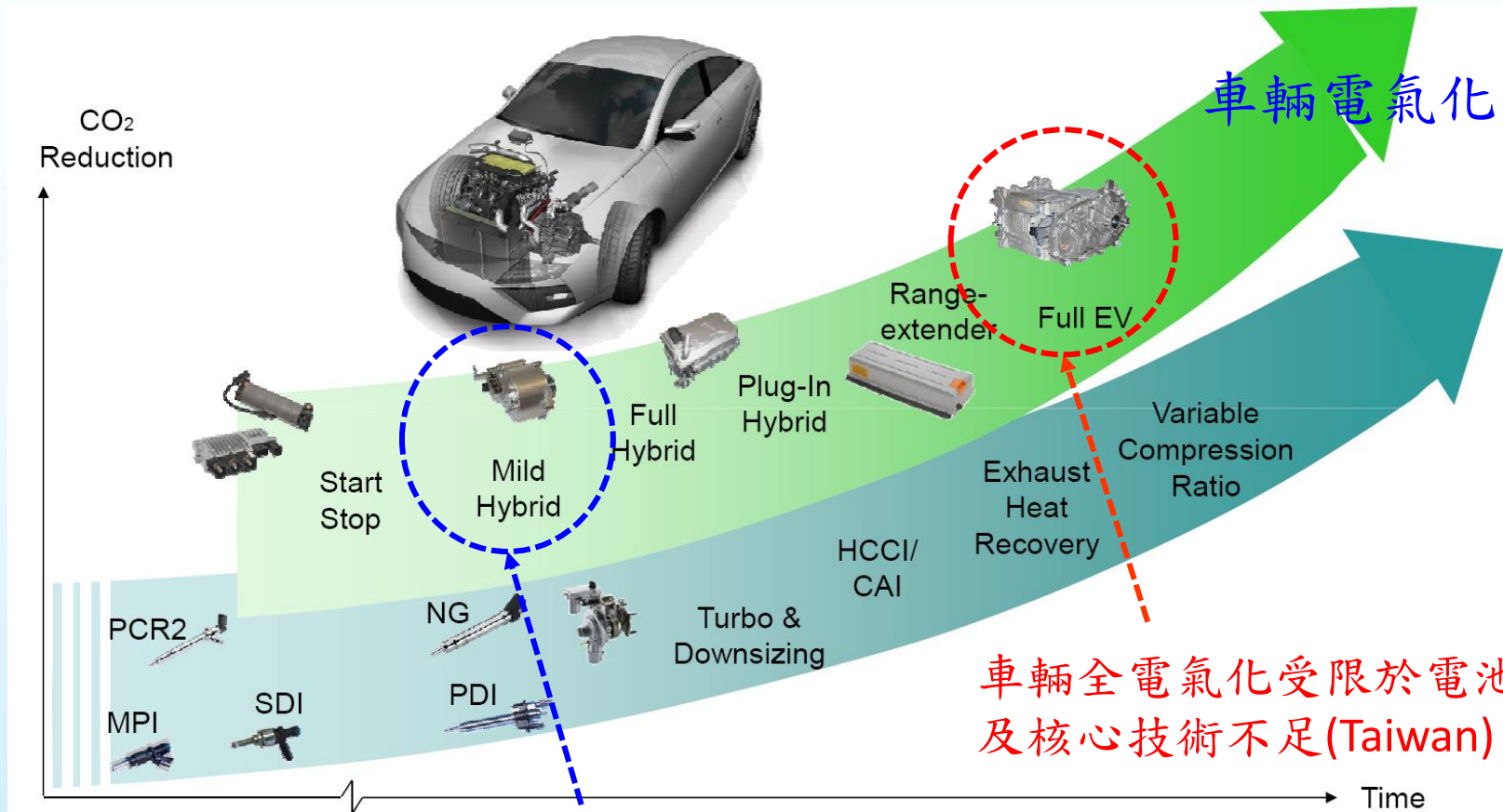
BSG系統簡介

Manufacturer Name	Average CO2 (65%)	Average CO2 (100%)	Number of registrations
TOYOTA MOTOR EUROPE NV SA	103.6	121.9	515,028
RENAULT S.A.S	105.4	120.8	800,674
AUTOMOBILES PEUGEOT	107.7	121.5	773,864
AUTOMOBILES CITROEN	108.7	122.6	654,993
FIAT GROUP AUTOMOBILES	109.8	117.2	686,449
S.P.A			
KIA MOTORS CORPORATION	114.5	129.5	329,474
SEAT SA	114.8	127.2	252,173
FORD-WERKE GMBH	116.5	128.7	917,725
HYUNDAI MOTOR COMPANY	118.8	132.2	416,987
VOLKSWAGEN AG	119.3	133.0	1,535,755
ADAM OPEL AG	119.7	133.0	814,229
SKODA AUTO AS	120.0	132.2	460,603
VOLVO CAR CORPORATION	121.9	142.1	204,539
NISSAN INTERNATIONAL SA	122.3	137.3	423,818
AUDI AG	122.4	137.8	657,068
BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG	123.6	137.5	762,027
DAIMLER AG	123.9	142.8	631,475
GM KOREA COMPANY	124.3	141.1	161,153
AUTOMOBILE DACIA SA	125.1	136.9	232,256
MAZDA MOTOR CORPORATION	128.8	141.8	113,565

BSG系統簡介

❖ 研究動機

車輛電氣化為降低CO2排放之重要手段



從產品定位、成本、專利障礙及核心技術
(Taiwan)>>較適合台灣現階段之研發投入

BSG系統簡介

❖ 油電複合動力車之分類

Key functionality	Micro hybrid	Mild hybrid	Full hybrid
Electric accessory drives	●	●	●
Minimal regenerative braking	●	●	●
Comfort Cranking	●	●	●
High speed cranking		●	●
Torque smoothing		●	●
Power assist (boost)		●	●
Operating point modification			●
Full regenerative braking			●
Full power assist			●

BSG系統簡介

Honda IMA

Integrated Motor Assist



Toyota

Hybrid Synergy Drive



Hybrid system comparison

	Fuel economy improvement				Driving performance	
	Idling stop	Energy recovery	High-efficiency operation control	Total efficiency	Acceleration	Continuous high output
Series	●	⊙	●	●	○	○
Parallel	●	●	○	●	●	○
Series/parallel	⊙	⊙	⊙	⊙	●	●

⊙ Excellent ● Superior ○ Somewhat unfavorable

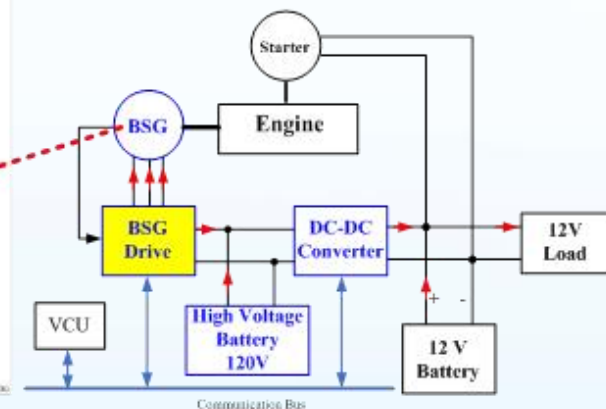
Entry barrier:

Patent, technology and high cost effectiveness(mass production)

BSG系統簡介

機械結構變化最少，專利障礙少，
減碳排放效果(120V)可符合2020法規，
性價比高

傳統引擎



- 以一只交流電機取代發電機，並同時具有馬達模式(熱機啟動)、發電機模式。
- 動力以皮帶與引擎出軸耦合。
- 皮帶傳動之一體化啟動馬達與發電機(Belt Integrated Starter and Generator, BSG)。

BSG系統簡介

❖ 美國通用汽車(General Motors) e-Assist 系統

2013 Chevrolet Malibu Eco with eAssist

Emergency Response Guide

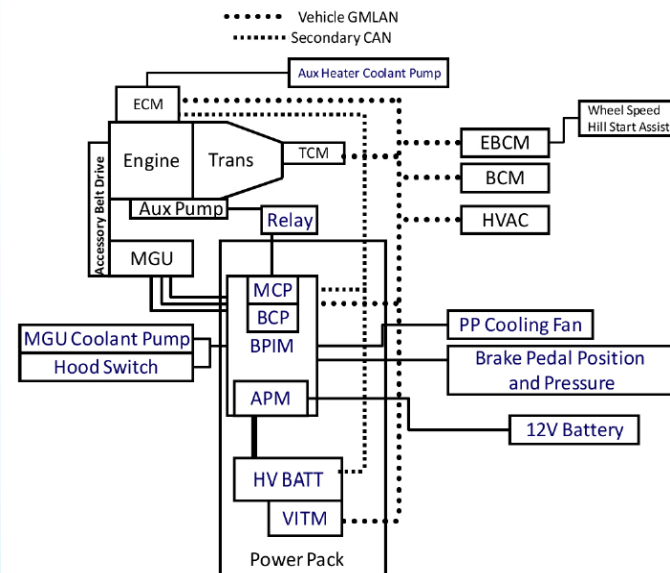


Figure 26. eAssist Control System Diagram

Environmental	<ul style="list-style-type: none"> Air-cooled 80 to 134V_{dc} input operating voltage -30 to +70°C ambient operation
DC / AC Inverter	<ul style="list-style-type: none"> 120V Three-phase AC motor 20kW peak, vector-controlled Up to 150 amps continuous phase current, with sufficient cooling Peak phase current in excess of 300 amps
DC / DC Converter	<ul style="list-style-type: none"> 1.6kW isolated 120 V_{dc} to 14 V_{dc} unidirectional 12.5 – 15.5 V_{dc} output voltage range
Controller	<ul style="list-style-type: none"> Main processor <ul style="list-style-type: none"> 32-bit 128 MHz Freescale Viper™ 3Mbyte flash, 128Kbyte SRAM Motor control processor <ul style="list-style-type: none"> 128 MHz Freescale Taipan™ 2Mbyte flash, 64Kbyte SRAM



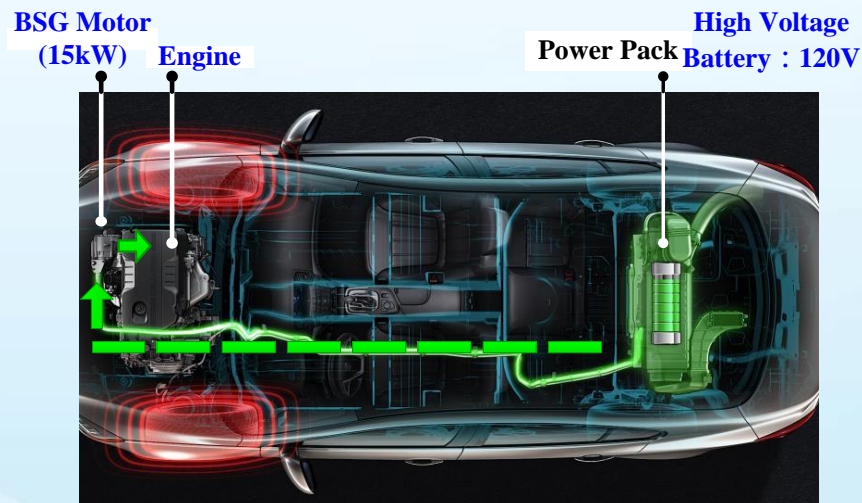
BSG系統簡介

❖ 美國通用汽車(General Motors) e-Assist 系統

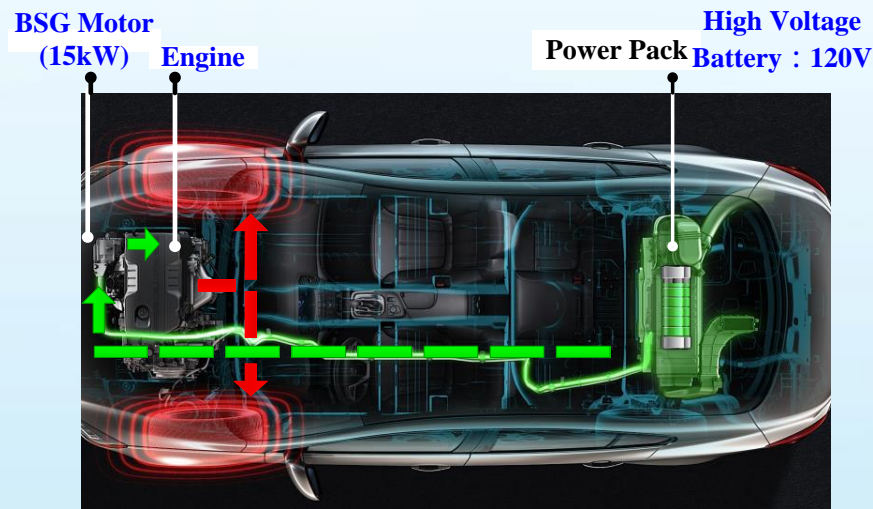
➤ 輕混(Mild Hybrid)

❖ 馬達模式

➤ 引擎熱機啟動(Cranking)



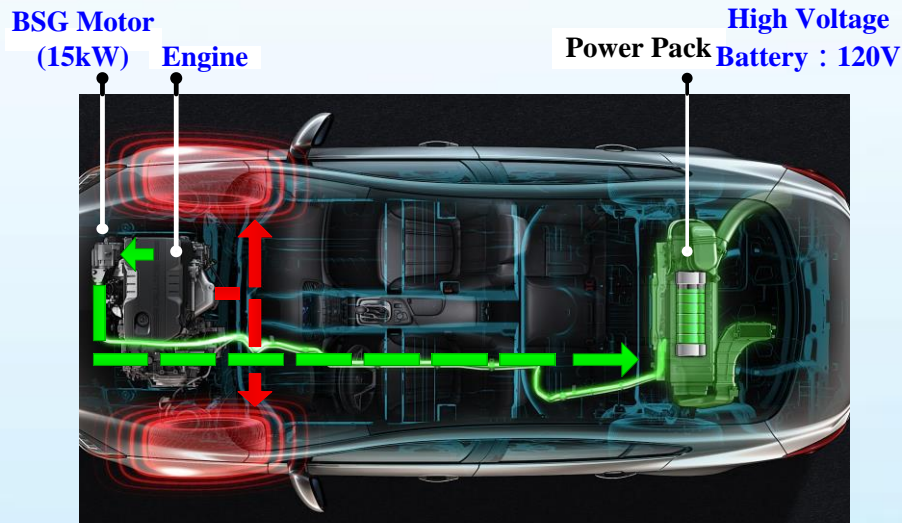
➤ 助力模式(Boost Mode)



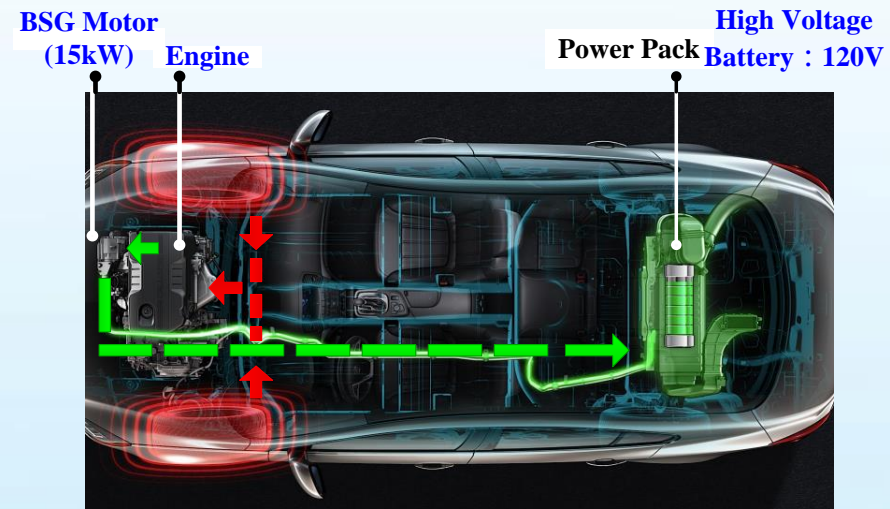
BSG系統簡介

❖ 發電機模式

➤ 發電 Generating



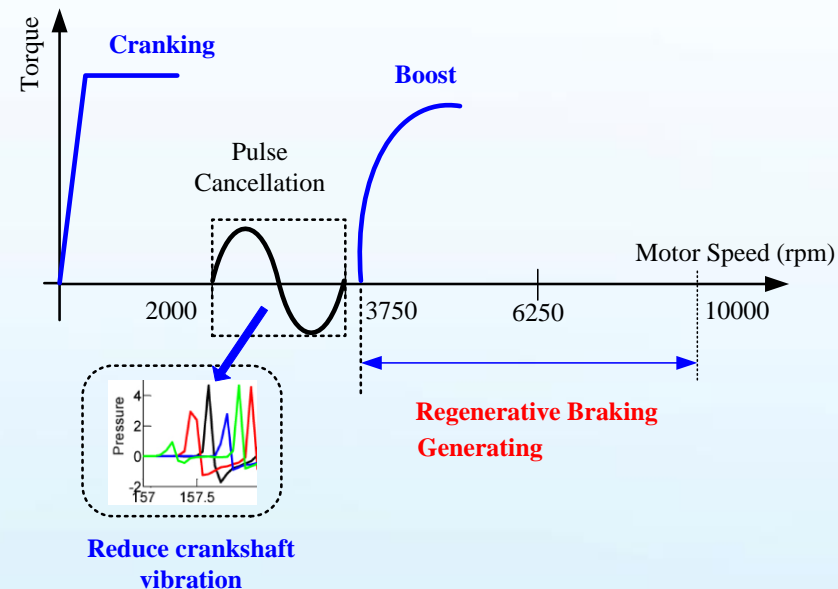
➤ 減速回生發電 Regenerative Braking



BSG系統簡介

❖ BSG系統之需求功能，依據IM轉速可分為

1. 引擎熱機啟動(Cranking)
2. 助力模式(Boost Mode)
3. 引擎低速輸出轉矩之脈動抑制
(Reduce Crankshaft Vibration)
4. 發電(Generating)
5. 減速回生發電(Regenerative Braking)

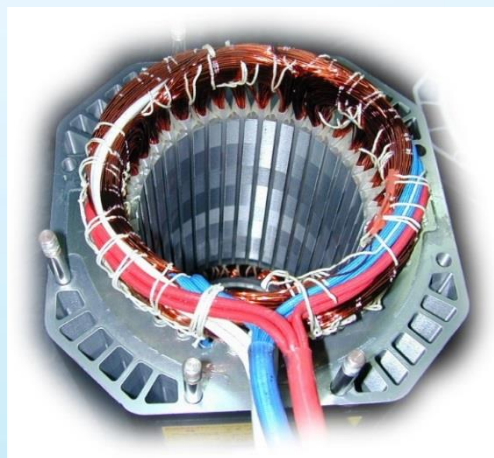


感應馬達工作原理

❖ 馬達分類

	感應馬達	永磁同步馬達
優點	1. 定功率輸出範圍較廣 2. 可靠度、技術成熟度及成本佳	1. 功率密度及效率高
缺點	1. 功率密度及效率差 2. 定功率區參數變異	1. 定功率輸出範圍窄 2. 高溫產生退磁效應

Stator



Rotor
(Squirrel-cage winding)



感應馬達(IM)驅動技術

感應馬達可視為三只變壓器以Y接方式連結

❖ 感應馬達之等效電路

$$\text{Input power : } P_{in} = 3V_s I_s \cos \phi$$

$$\text{Stator copper loss : } P_{ls} = 3I_s^2 R_s$$

$$\text{Core loss : } P_{lc} = 3 \frac{V_m^2}{R_m}$$

$$\text{Power across air gap : } P_g = 3I_r^2 \frac{R_r}{s}$$

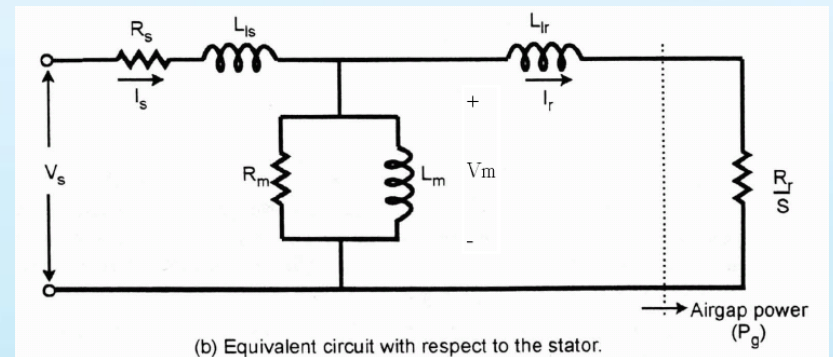
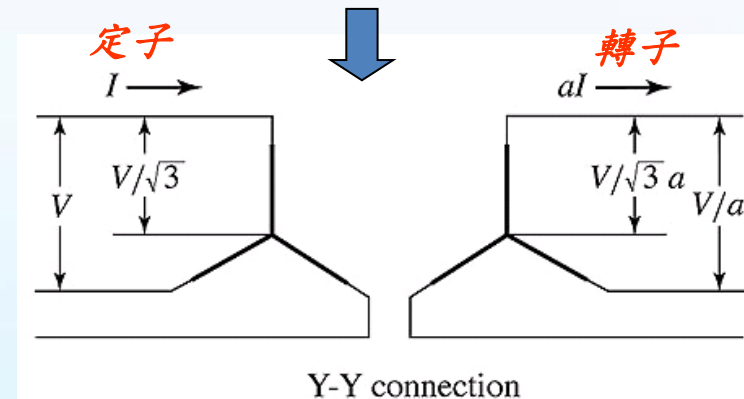
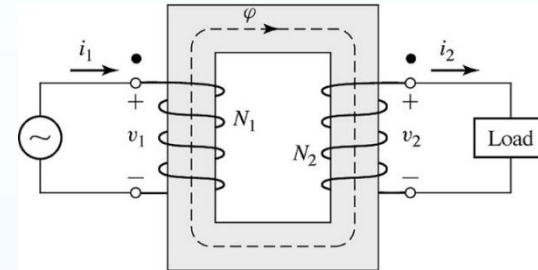
$$\text{Rotor copper loss : } P_{lr} = 3I_r^2 R_r$$

$$\text{Output power : } P_o = P_g - P_{lr} = 3I_r^2 R_r \frac{1-s}{s}$$

$$\text{Shaft power : } P_{sh} = P_o - P_{FW}$$

P_{FW} : friction and winding loss

$$T_e = \frac{P_o}{\omega_m} = \frac{3}{\omega_m} I_r^2 R_r \frac{1-s}{s} = 3 \frac{P}{2} I_r^2 \frac{R_r}{s \omega_e}$$

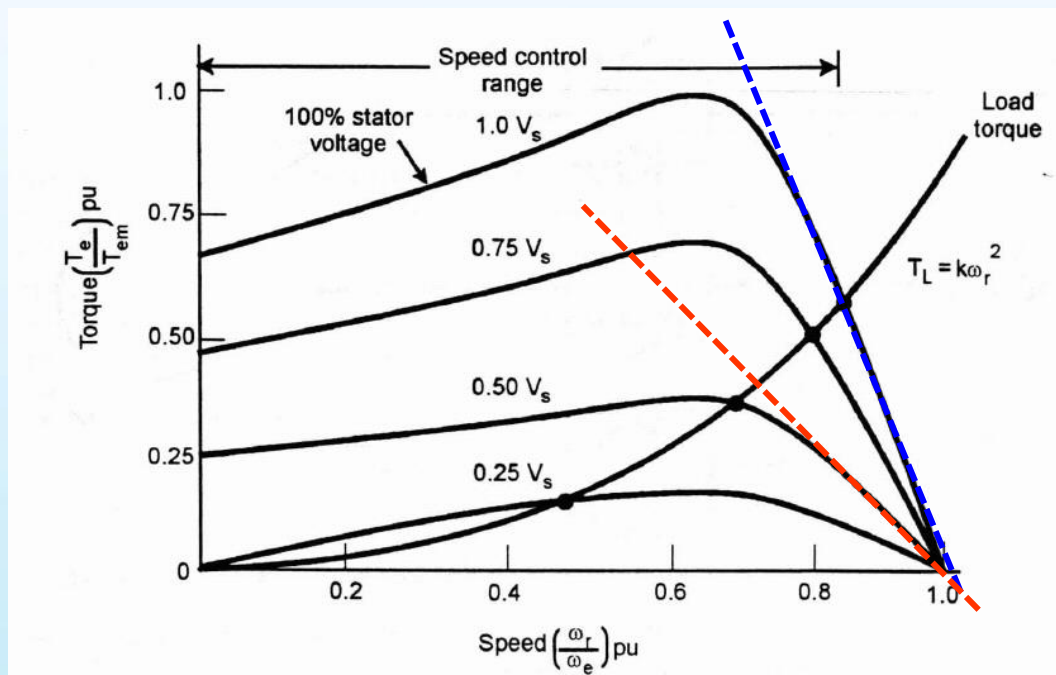


感應馬達工作原理

❖ 輸出轉矩方程式

- 相同電源頻率下，輸出轉矩與電壓平方成正比
- 相同電源頻率與電源電壓下，輸出轉矩與滑差頻率成正比

$$T_e = 3 \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{V_s}{\omega_e} \right)^2 \frac{\omega_{sl} R_r}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_{lr}^2}$$



感應馬達工作原理

❖ 感應馬達主導方程式(同步框)

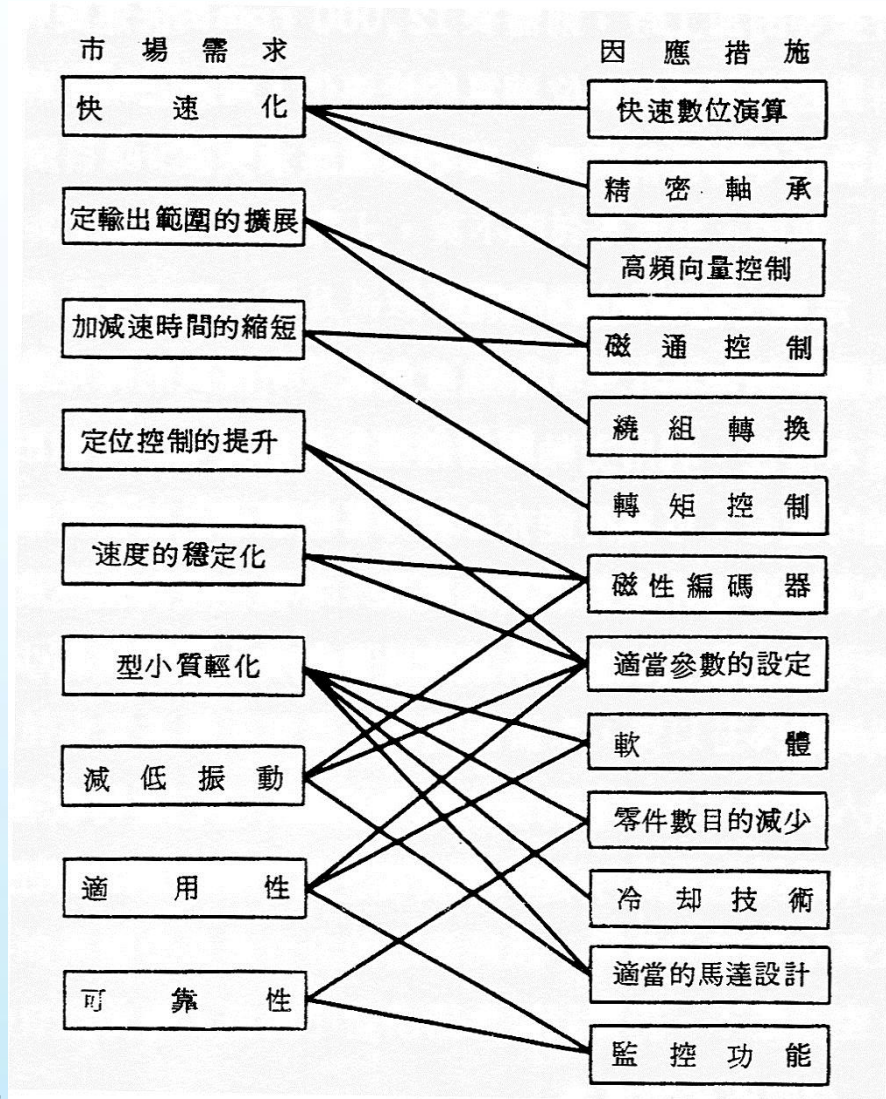
$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p\delta & \omega_e \delta & \frac{pL_m}{L_r} & \frac{\omega_e L_m}{L_r} \\ -\omega_e \delta & R_s + p\delta & \frac{-\omega_e^* L_m}{L_r} & \frac{pL_m}{L_r} \\ \frac{-L_m R_r}{L_r} & 0 & \frac{R_r}{L_r} + p & \omega_{sl} \\ 0 & \frac{-L_m R_r}{L_r} & -\omega_{sl} & \frac{R_r}{L_r} + p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix}$$

$$T_e = \frac{3PL_m}{4L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds})$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = T_e - T_L - B\omega_r$$

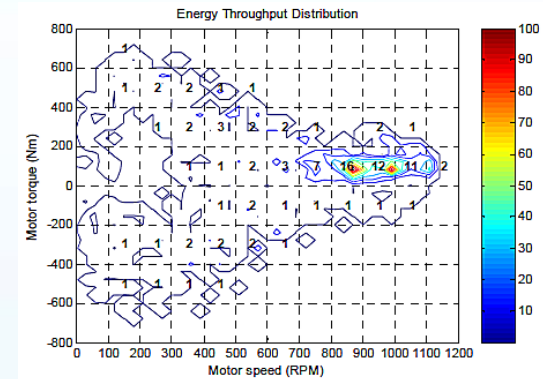
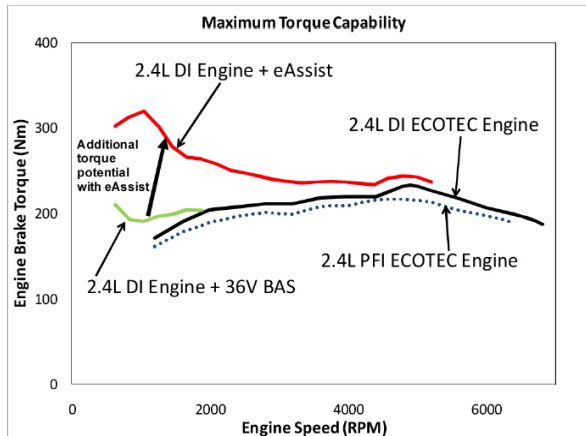
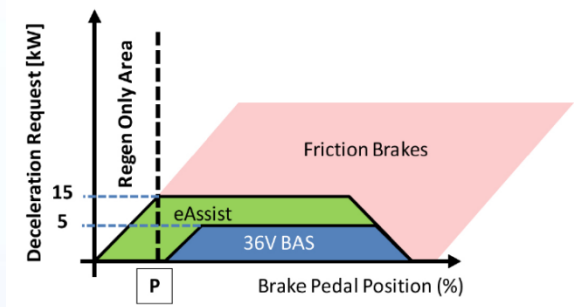
感應馬達工作原理

❖ 感應馬達工作需求與對策

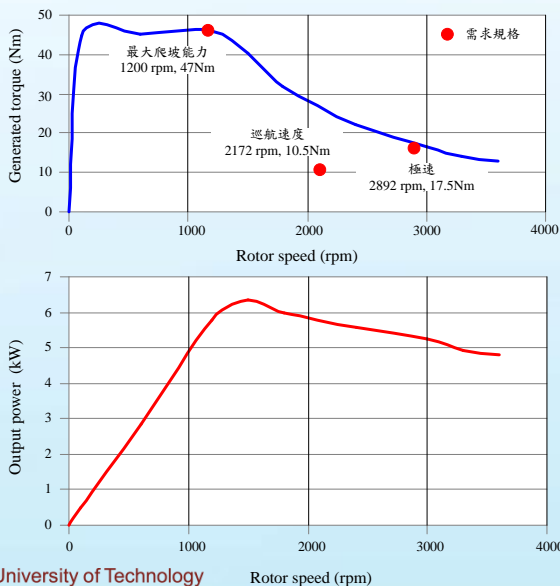


油電複和車之動力需求

車輛需求



馬達動力規格
+
控制策略



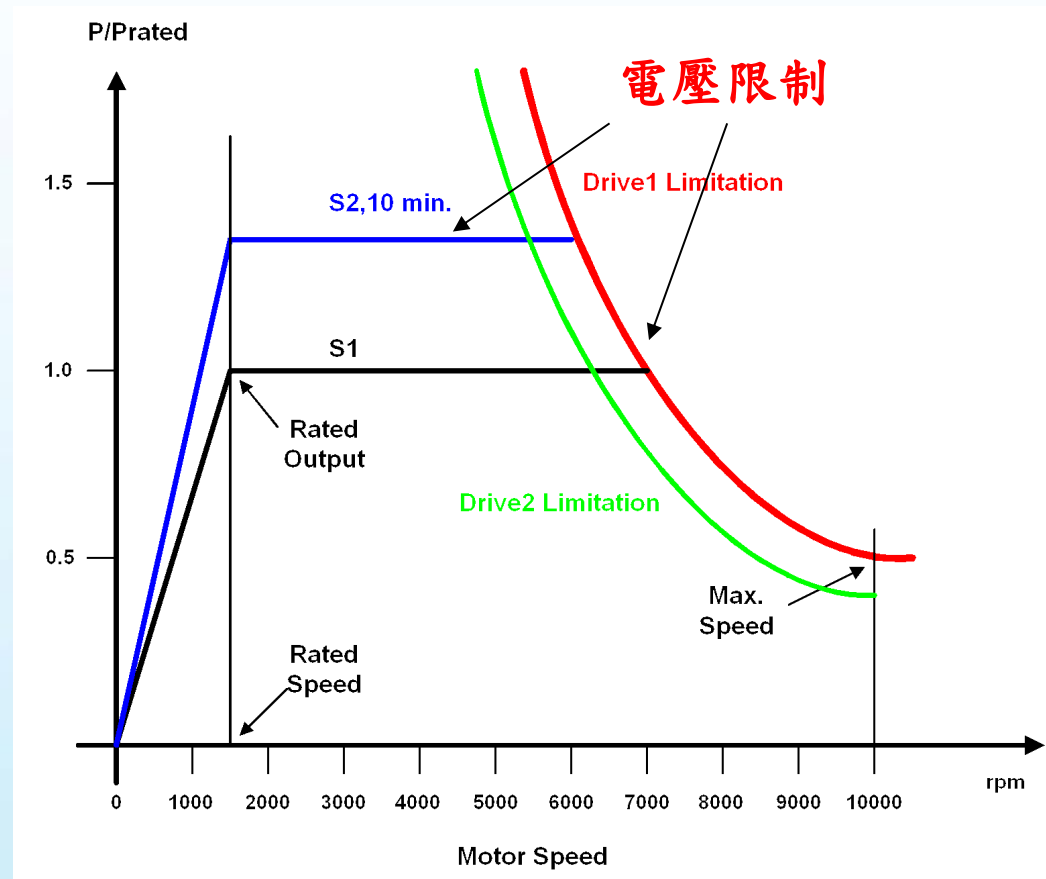
電動動力之特性

❖ 馬達/驅動器之需求輸出特性

- 定轉矩區: 提供啟動與加速轉矩
- 定功率區: 巡航與高速之動力

❖ 限制

- 馬達:
 - 定轉矩區: 磁飽和與散熱
 - 定功率區: 散熱
(損失以鐵損為主)
- 電池提供有限電壓與能量
- 體積
- 重量
- 散熱能力



感應馬達控制

❖ 感應馬達相關研究重點

➤ 電氣參數變異分析與抑制

由於磁場導向控制是利用內部馬達模型來做磁通向量估測，因此對馬達參數變異較敏感，尤其是轉子電阻與互感。

➤ 磁飽和之影響

磁飽和雖然屬於馬達參數變異，但該變異對經常用於電動車之定功率控制影響頗大。

➤ 控制架構-向量控制、磁束控制、滑差控制、定電壓控制及定功率控制。

感應馬達控制

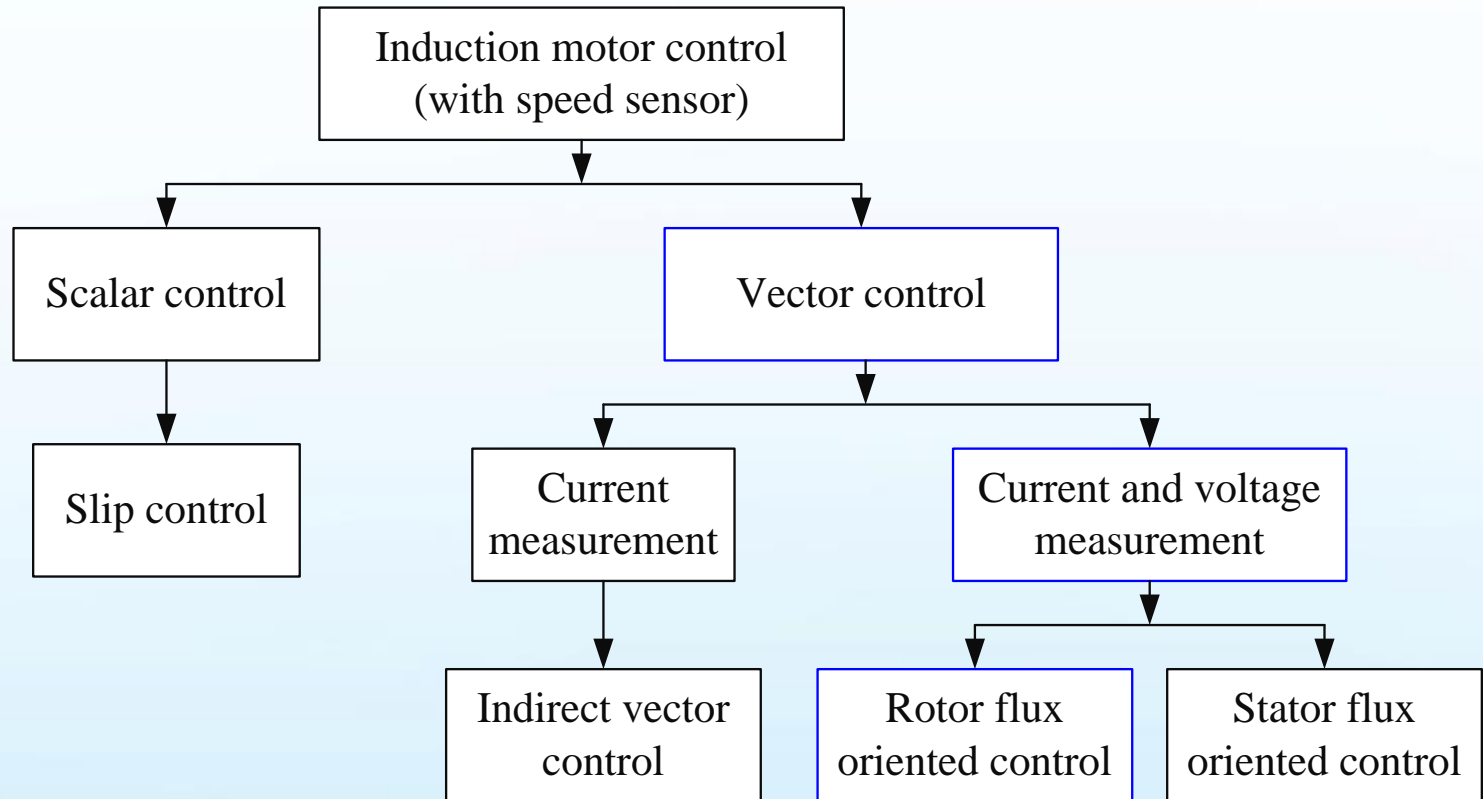
❖ 電氣參數變異分析與抑制

1. 轉子電阻變化主要環境溫度變化所致。
 - 馬達定子埋入正溫度係數之溫度感測元件來補償
2. 互感變異主要因改變感應馬達激磁電流所致
 - 互感參數量測(On-line或off-line)為基礎之控制策略
 - 電壓回授為主之控制策略
 - 以測試結果為基礎之查表方法

❖ 定轉矩與定功率控制

1. 車用馬達在定轉矩控制通常考慮變頻器電流限制下，將馬達轉矩最大化。
2. 定功率控制主要是馬達定子電壓隨著轉速而升高，使直流鏈電壓不足提供馬達所需電壓，此時會對馬達進行弱磁。

感應馬達控制

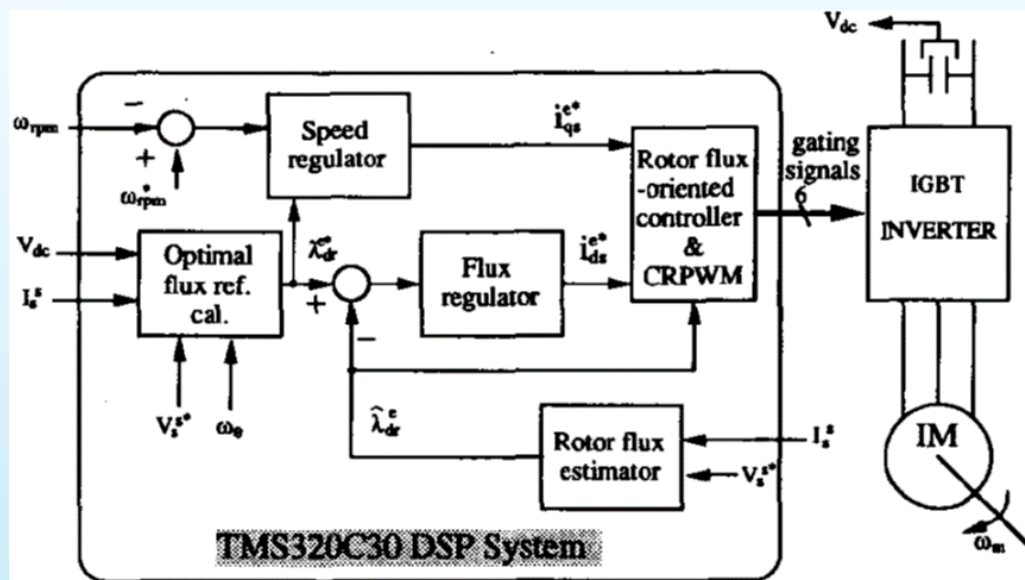


感應馬達控制

❖ 弱磁控制

1. 考慮電流電壓限制下以馬達數學方程為基礎推倒於弱磁區時最佳的磁通命令使轉矩最大化

➤ 對於互感變異影響較大



轉子磁場導向於弱磁區的控制方塊

National Taipei University of Technology

CPET

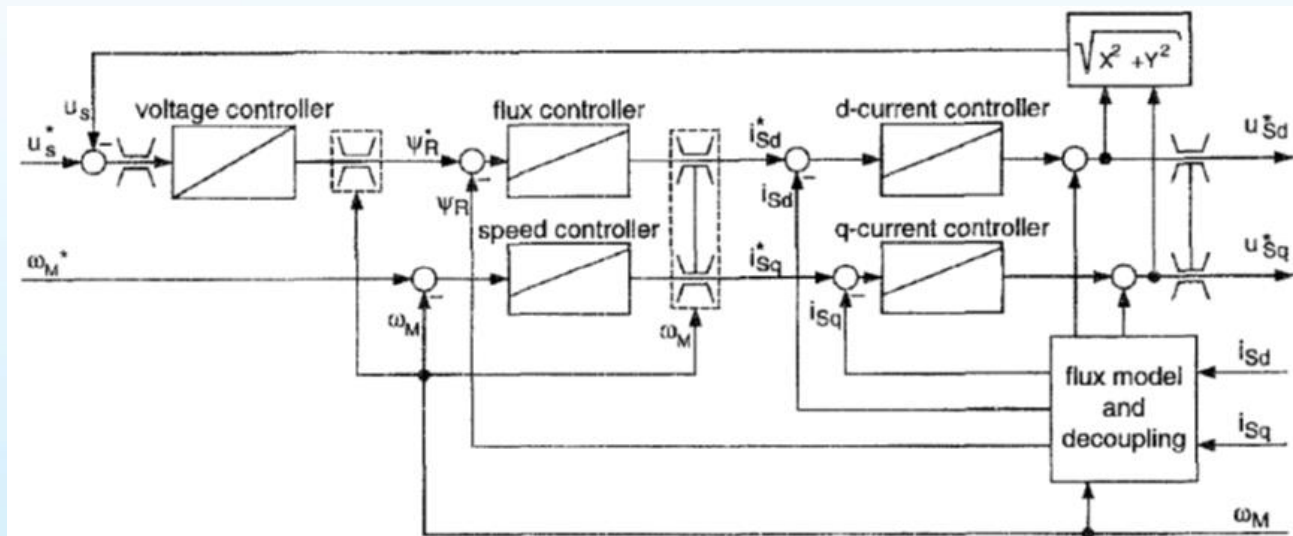
Center for Power Electronics Technology

感應馬達控制

❖ 弱磁控制

2. 以變頻器的電壓命令為依據來控制激磁電流

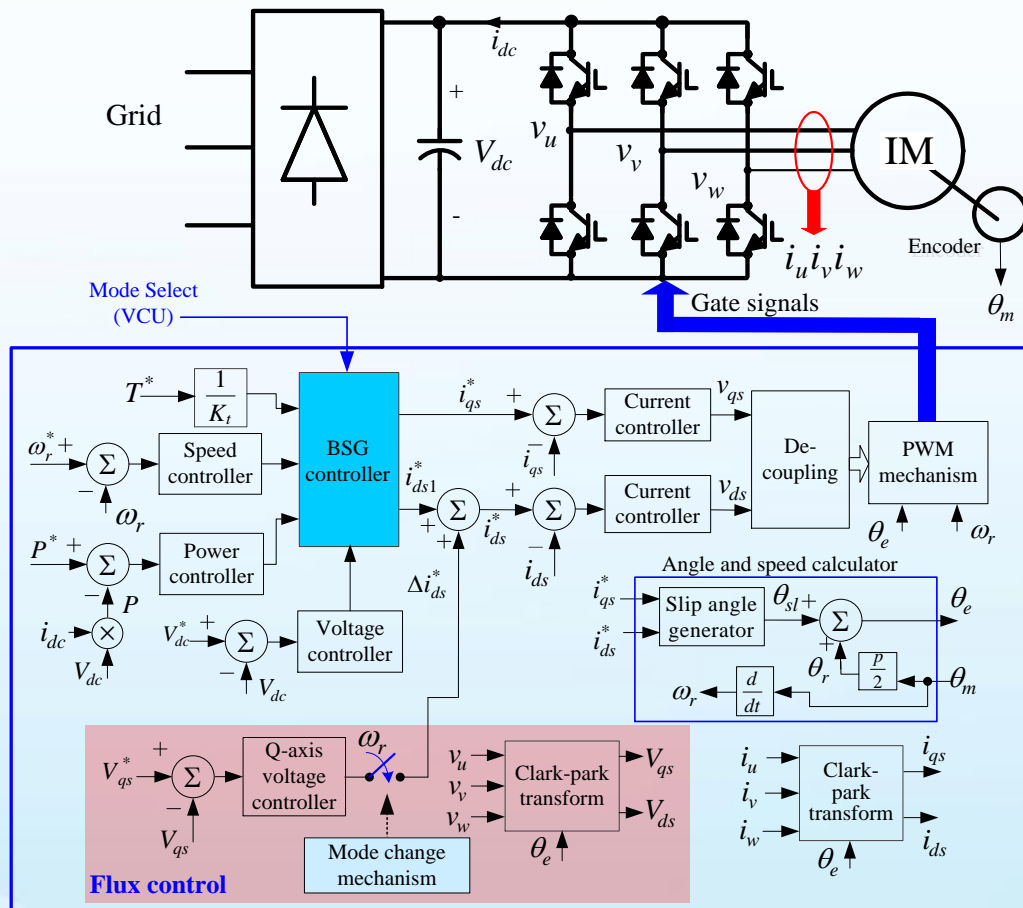
➤ 對於互感變異影響較小



轉子磁場導向於弱磁區的控制方塊

感應馬達控制

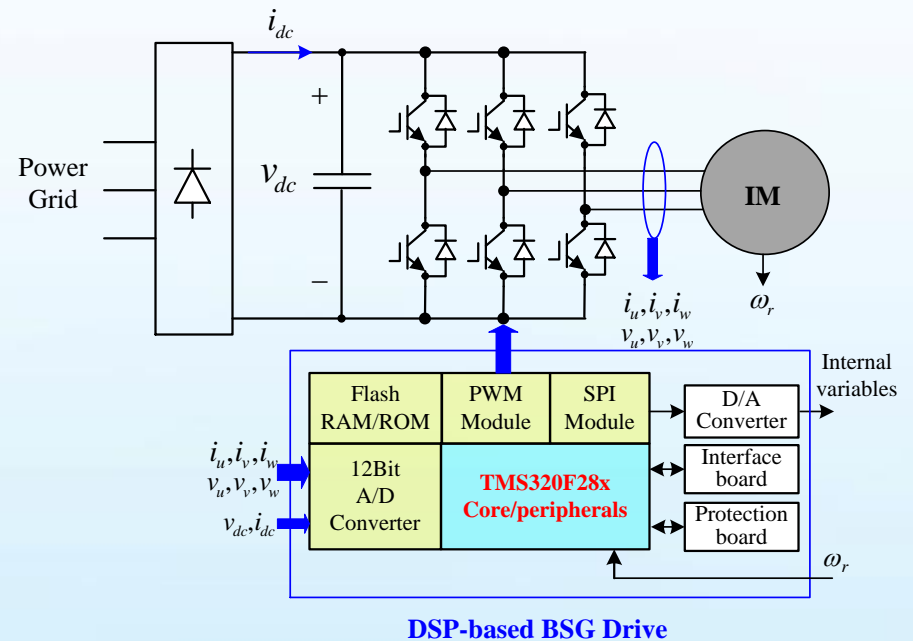
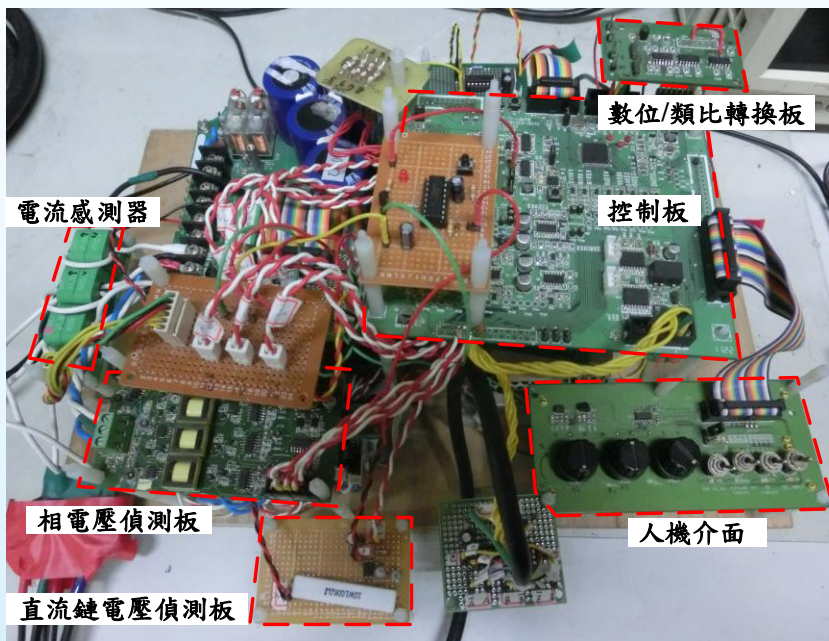
❖ 具磁束回授之向量控制架構



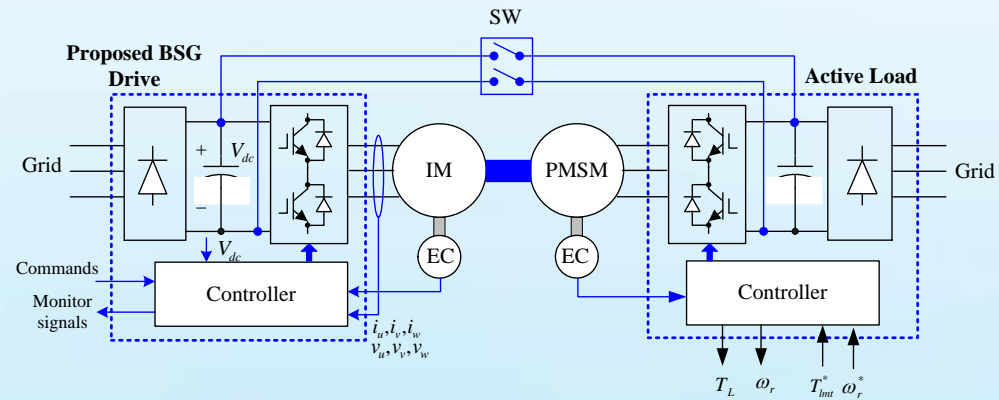
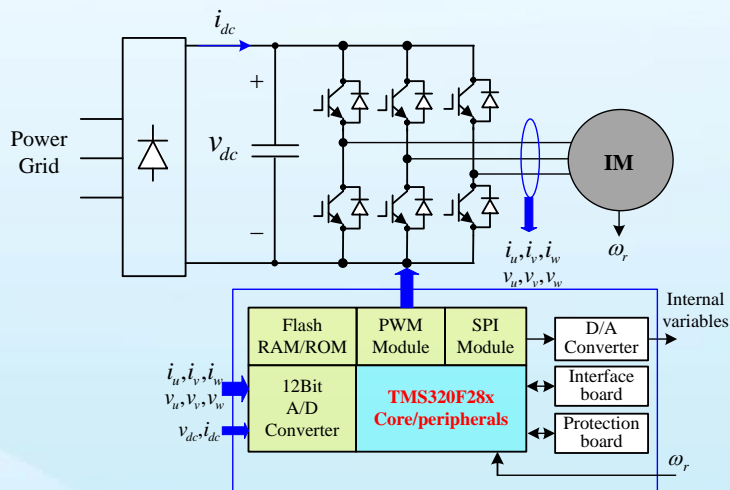
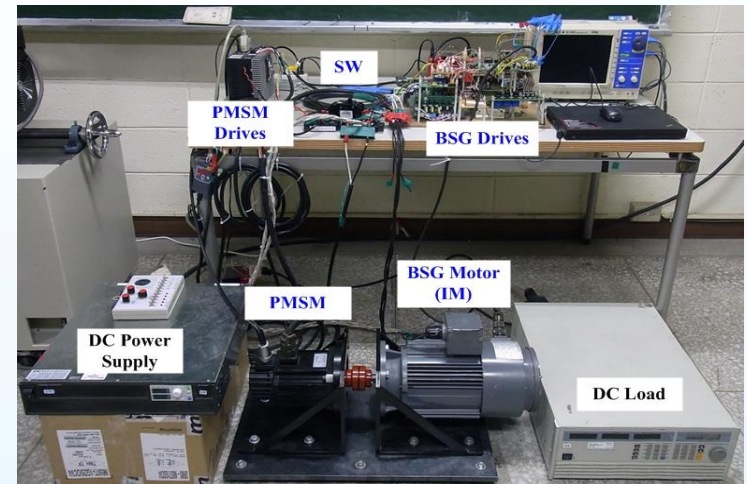
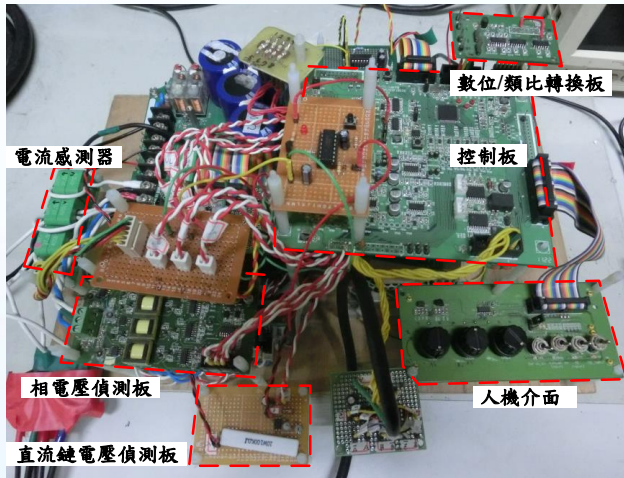
引擎啟動	<ul style="list-style-type: none"> *低速(0~1500 rpm) *定轉矩區之向量控制 *速度控制
助力模式	<ul style="list-style-type: none"> *中速(1500~4000rpm) *定功率區，使用具磁束回授之向量控制 *轉矩控制 <p>以無載 ramp 速度控制特性來呈現最大輸出轉矩之能力</p>
發電	使用向量控制對馬達轉矩控制之發電行為
減速回生發電	使用向量控制對馬達定轉矩控制之發電行為
馬達與發電之整合模式	整合BSG系統所需功能進行啟動、助力與高速發電之整合控制
自啟動發電	對直流鏈電壓做控制來抑制負載變動之影響

感應馬達驅動器研製

❖ 驅動器實體與架構圖



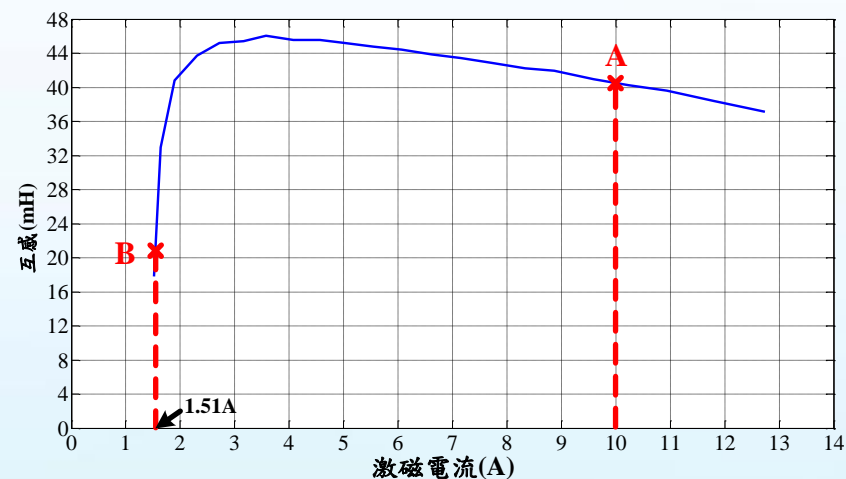
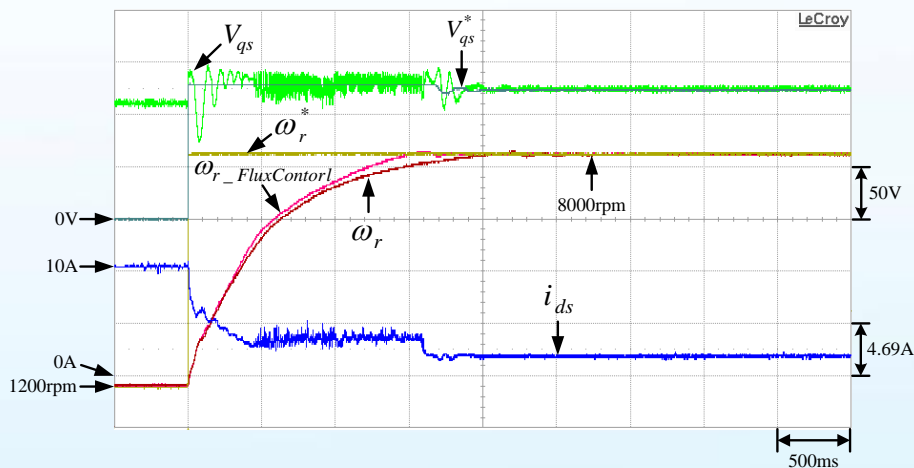
實驗設置



馬達模式實驗結果

❖ 加入q軸電壓控制器

➤ 速度步階 1200rpm \rightarrow 8000rpm

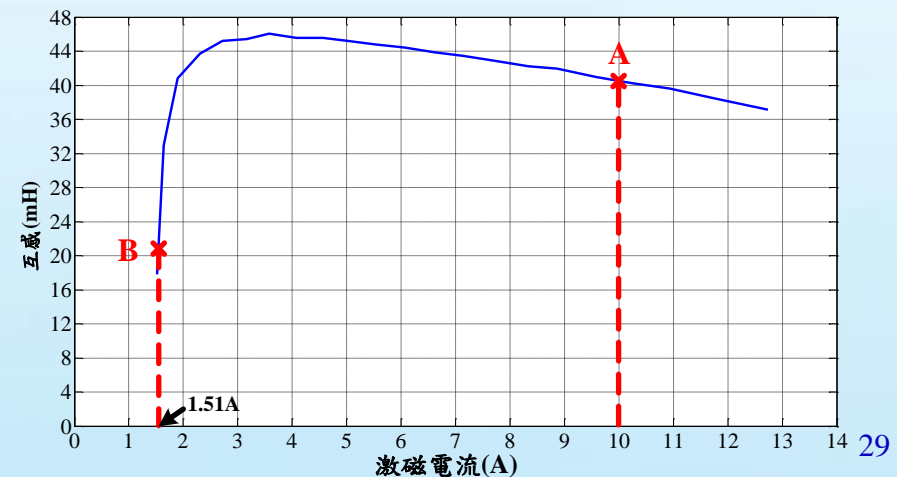
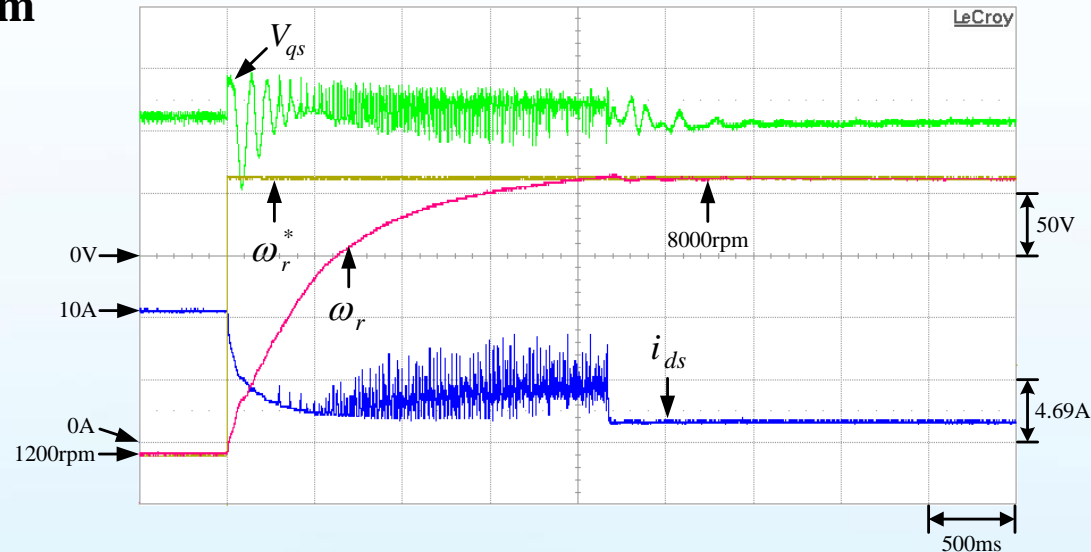


馬達模式實驗結果

❖ 無q軸電壓控制器(F公司：SP3-900)

➤ 速度步階 1200rpm → 8000rpm

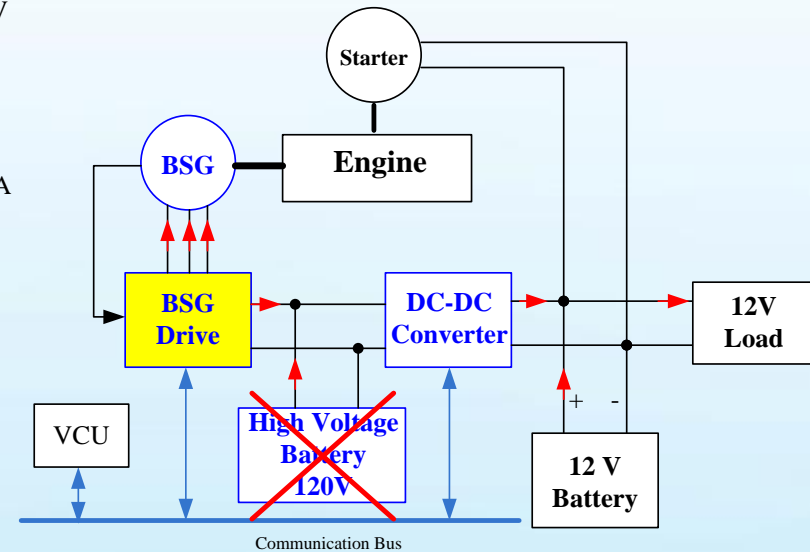
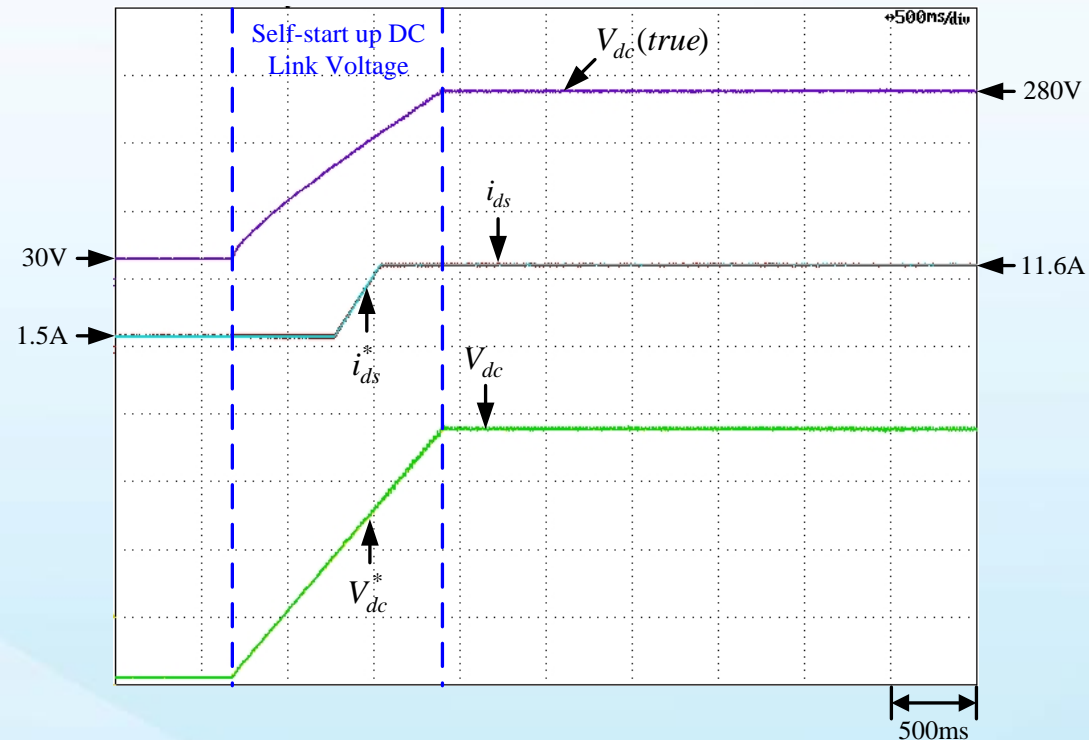
- 以 $\frac{1}{\omega_r}$ 方式弱磁。
- A點為定轉矩區之電感，約為40mH，而B點為使用 $\frac{1}{\omega_r}$ 方法於8000rpm之電感，約為20mH。
- B點電感為A點電感的50%
- 以 $\frac{1}{\omega_r}$ 控制方法，會造成激磁磁場不足之問題。



發電模式實驗結果

❖ 自啟動發電

- 固定**1500 rpm**，以**30V**為起始電壓並對直流鏈電壓做控制將電壓升至**280V**



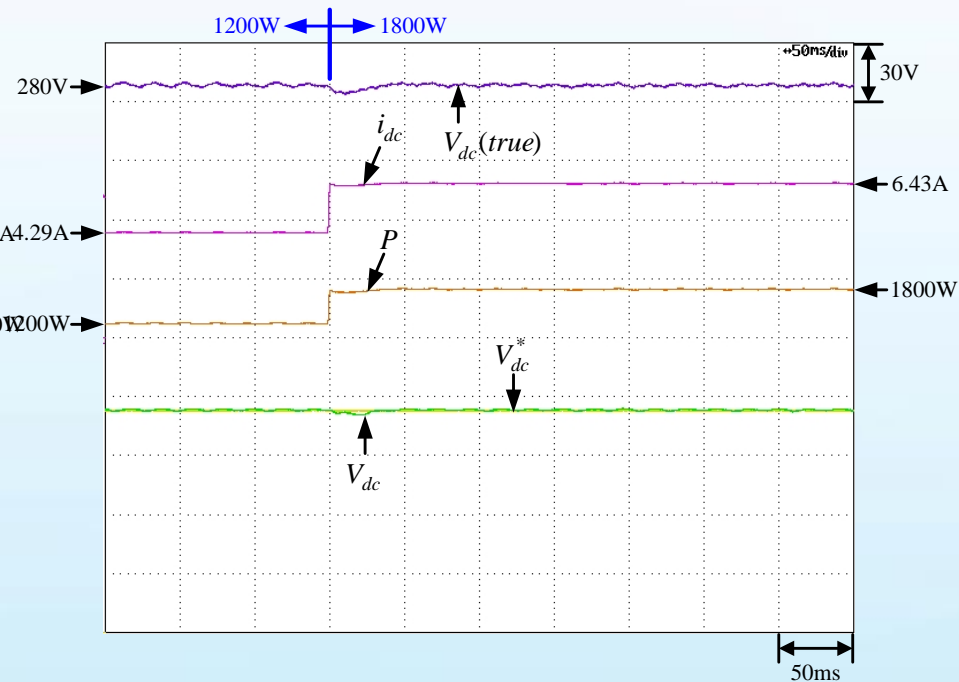
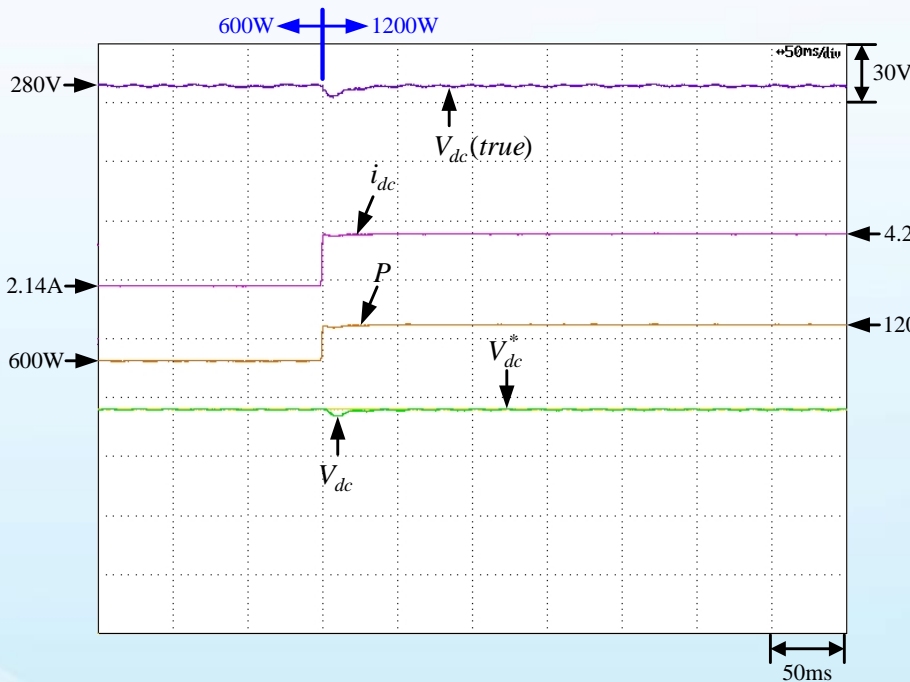
發電模式實驗結果

❖ 自啟動發電對負載變動之抑制能力

➤ 固定1500 rpm

✓ 1/3至2/3額定負載

✓ 2/3額定負載至滿載

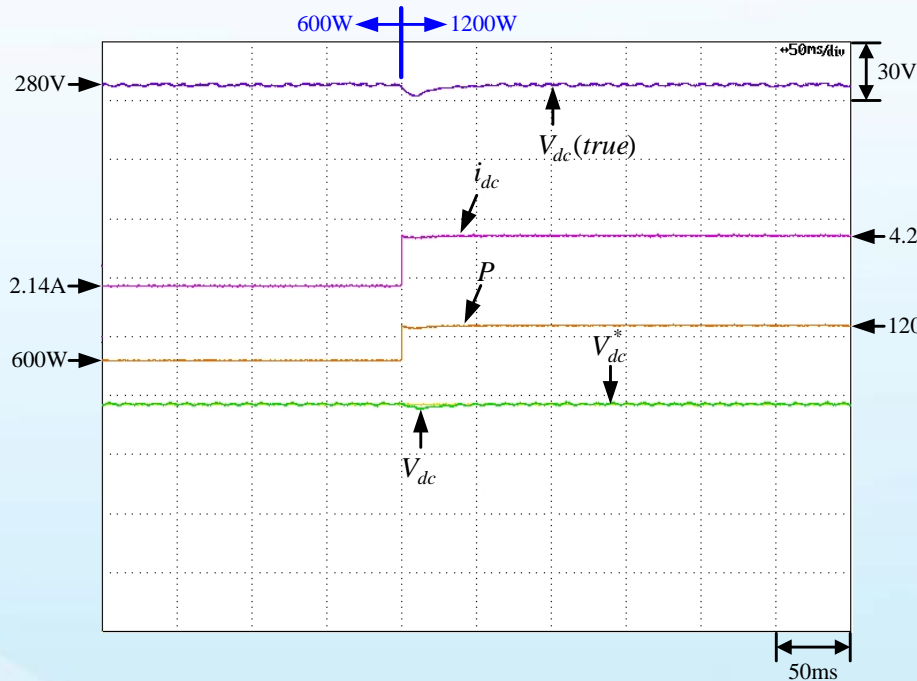


發電模式實驗結果

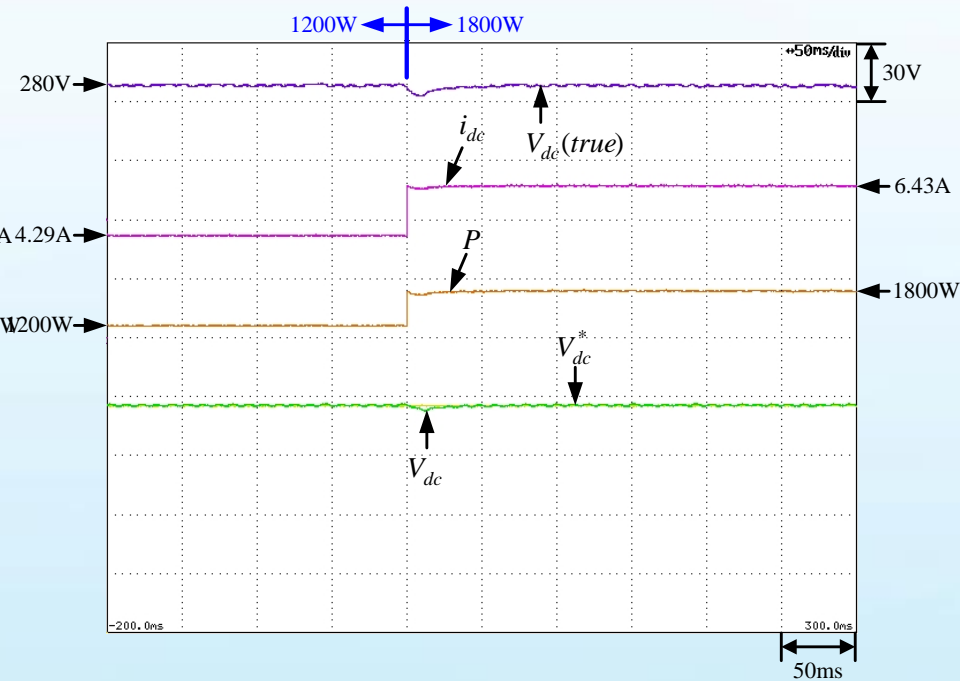
❖ 自啟動發電對負載變動之抑制能力

➤ 固定3000 rpm

✓ 1/3至2/3額定負載



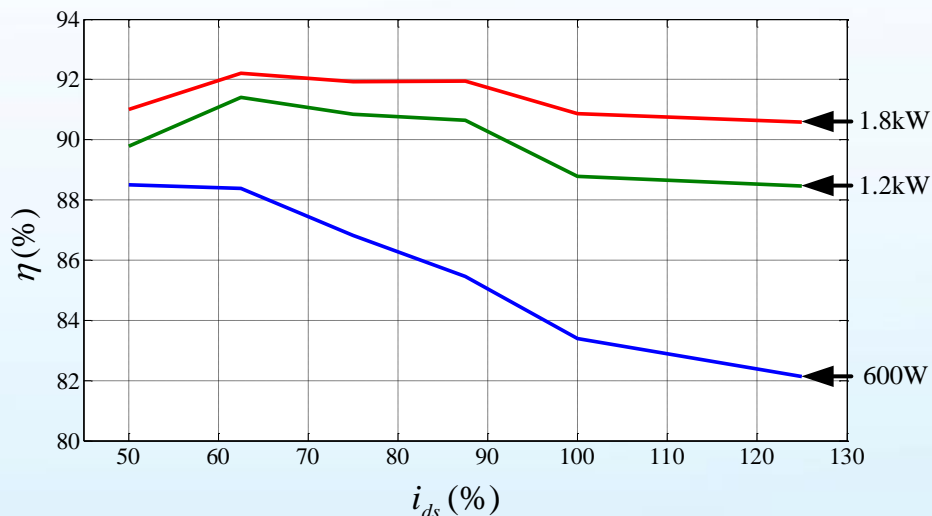
✓ 2/3額定負載至滿載



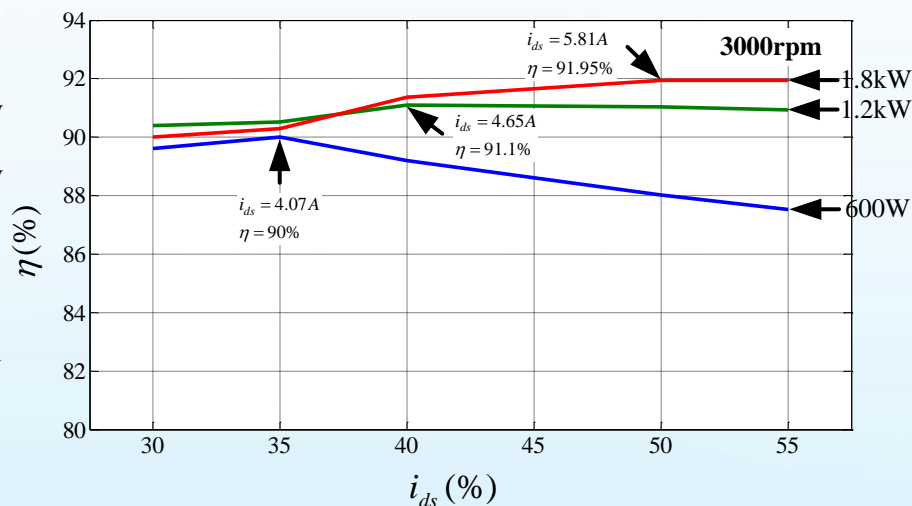
發電模式實驗結果

❖ 自啟動發電之效率量測

➤ 固定1500 rpm



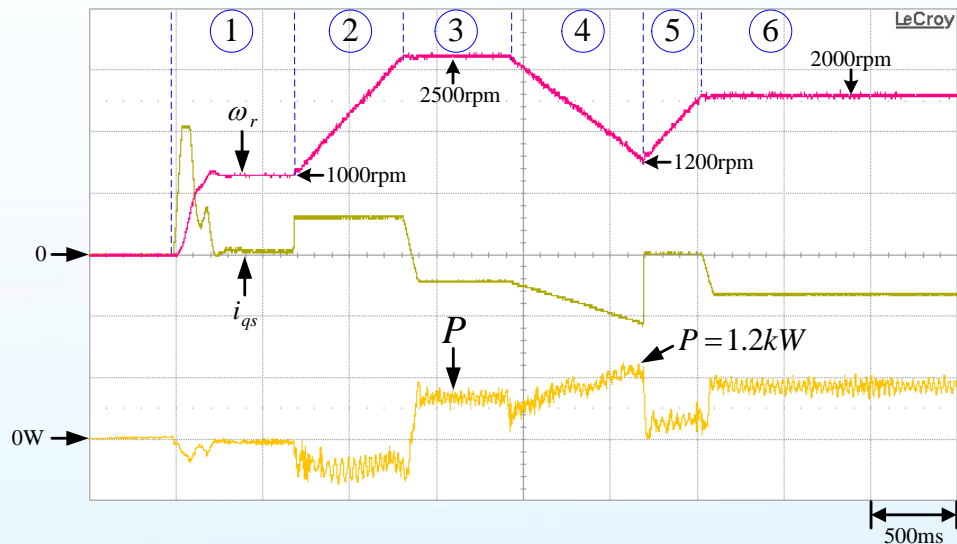
➤ 固定3000 rpm



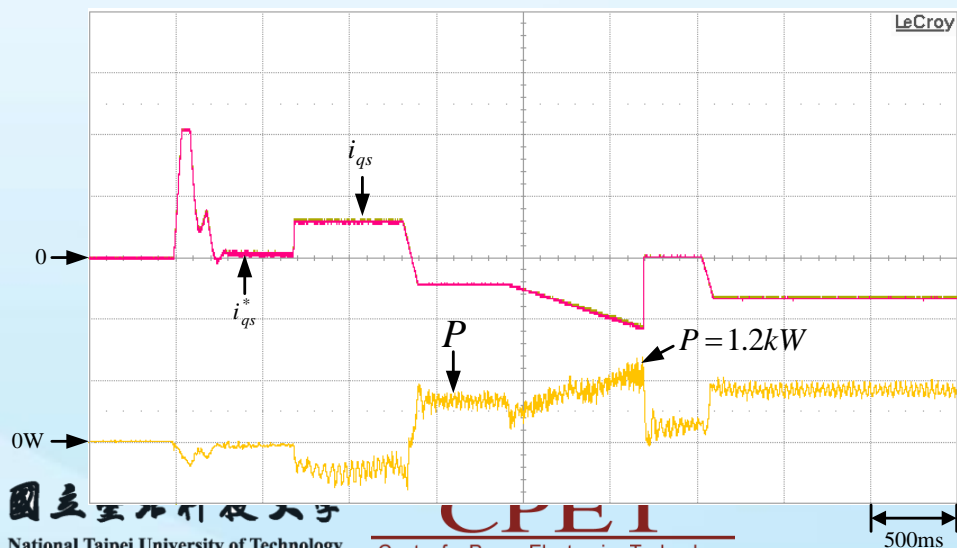
✓ 負載越低時，激磁電流對效率的影響較大。

馬達與發電之整合實驗結果

❖ 整合模式



- ① 引擎啟動
- ② 助力模式
- ③ 定速發電
- ④ 減速回生發電
- ⑤ 引擎加速
- ⑥ 定速發電



結論

- 以一只TMS320F28035 DSP作為控制核心，完成感應馬達用於BSG之驅動模組，使感應馬達同時具備於定轉矩區及定功率區之驅動及發電功能。
- 因應感應馬達互感變異過大造成之控制失調問題，在定功率區加入磁束控制，以q軸電壓控制器微調激磁電流增加暫態轉矩響應。
- 完成高壓電池失效下之自啟動發電功能，並同時加入馬達直流鏈電壓控制來提供車用負載之功率需求，在負載變動時直流鏈電壓的暫態響應並未超過DC/DC轉換器10%的輸入電源變動。
- 模擬BSG馬達於車輛作動之需求，將感應馬達操作於馬達模式與發電機模式，並將整體動作連貫以更真實呈現所提系統之性能可滿足BSG需求。

Thanks for your attention